

# 阳极氧化铝表面激光处理工艺与机理

李彤彤<sup>1,2</sup>, 沈宝东<sup>2,3\*</sup>, 李重河<sup>1,2</sup>, 兰豹豹<sup>1,2</sup>, 陈光耀<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200072;

<sup>2</sup>上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072;

<sup>3</sup>上海银玛标识股份有限公司, 上海 201601

**摘要** 为了解决铝材表面激光处理无法形成高色差、高对比度的黑色图形问题,以阳极氧化 5052 铝合金为研究对象,选用脉冲宽度为 4 ns 的光纤激光器,设定扫描速度为 130 mm/s,频率为 300 kHz,扫描间距为 0.005 mm,设定功率为 27% $P_0$ ~33% $P_0$  ( $P_0$  为激光器的额定功率),以得到高色差、高对比度的黑色图形,研究激光功率对图形对比度及微观形貌的影响,分析阳极氧化铝表面激光处理形成图形的机理。结果表明:当激光功率超过 1.64 W 时,激光能量达到铝材熔化阈值,材料表面开始形成图形,随着功率的增大,对比度逐渐上升;当激光功率增大到 2.13~2.76 W 时,铝材表面熔化与蒸发形成细裂纹的微观形貌,宏观显示为黑色,对比度达到最大;激光功率增大至 3.32 W 后,铝材表面完全熔化,细裂纹形貌消失,宏观显示为灰白色,对比度下降。该技术有助于激光与铝材作用机理的进一步研究,对推动物联网技术的发展具有重要意义。

**关键词** 激光技术; 激光表面处理; 加工参数; 形貌变化; 高对比度; 高色差

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.181402

## Laser Surface Processing on Anodic Aluminum Oxide

Li Tongtong<sup>1,2</sup>, Shen Baodong<sup>2,3\*</sup>, Li Chonghe<sup>1,2</sup>, Lan Baobao<sup>1,2</sup>, Chen Guangyao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

<sup>3</sup>Shanghai Yinma Marking Co., Ltd., Shanghai 201601, China

**Abstract** To solve the problem of laser surface processing not forming high-chromatic-aberration and high-contrast black patterns on aluminum alloys, a fiber laser machine with a 4-ns pulse width is used to mark 5052 anodic aluminum oxide (AAO) alloy at a scanning speed of 130 mm/s, a frequency of 300 kHz, a scanning pitch of 0.005 mm, and a setup power of 27% $P_0$ -33% $P_0$  ( $P_0$  is the rated power of the laser). We obtain a black pattern with a high chromatic aberration and high contrast. The effect of the laser power on the contrast and micro-morphology of the pattern is studied, and the mechanism of pattern formation by laser surface processing on the AAO is analyzed. Results show that when the laser power exceeds 1.64 W, the laser energy reaches the melting threshold of aluminum and a pattern is formed on the surface. With the increase of laser power, the contrast gradually increases. When the laser power increases to 2.13-2.76 W, the AAO surface forms a fine-crack micro-morphology by melting and evaporation, the macroscopic display is black, and the contrast reaches the maximum. When the laser power increases to 3.32 W, the surface of the aluminum material melts completely, the fine-crack micro-morphology disappears, the macroscopic display is grayish white, and the contrast decreases. These results contribute to further research on the mechanism of laser surface processing on aluminum, which is helpful for promoting the development of the Internet of Things.

**Key words** laser technology; laser surface processing; processing parameters; change of micro-morphology; high contrast; high chromatic aberration

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 240.6700

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-03-15; 录用日期: 2019-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51574164, U1760109)

\* E-mail: yinmabiaooshi@163.com

# 1 引言

作为重要的工业基础材料,铝合金具有强度高、延展性好等性能,其经阳极氧化处理后可以呈现不同颜色,被广泛应用于各行各业<sup>[1]</sup>。近年来,物联网技术的发展要求实现二维条码与图形的快速标记。常规的标记方法<sup>[2]</sup>有贴标签、印刷、喷印等,但效率低、有污染,且无法满足快速标记要求;而利用激光表面处理技术制作图形与条码,不仅成本低、精度高、效率高,还能防伪,该技术已被广泛用于工业生产<sup>[3]</sup>。

铝合金的激光处理<sup>[4]</sup>一般选用波长为 1064 nm 的普通脉冲激光,铝合金对激光吸收率较低,材料表面经激光处理形成的图形为对比度低的灰白色,无法被工业扫描枪读取,进而无法实现铝合金产品的在线快速识别。因此,如何标记色差、对比度高的图形与条码成为亟待解决的问题。文献调研结果显示,对于金属激光着色作用的机理有多种解释<sup>[5-7]</sup>,例如:利用高能量激光束照射在材料表面,局部升温产生熔化或蒸发,从而产生图形;金属材料中含有铁、铬、锰、镍等元素,激光标记后发生氧化反应,进而生成氧化薄膜,光在薄膜表面发生干涉,显示出不同颜色等。

一些学者对铝材激光标记工艺参数进行了研究。曹荣华<sup>[8]</sup>采用脉冲宽度为 80~260 ns 的光纤激光器对 6061 铝合金进行试验,研究了材料去除率对图形对比度的影响;陶亮等<sup>[9]</sup>采用灯抽运激光器对 2021、5052、6063、7075 这 4 种铝合金进行试验,研究了铝材化学成分对图形对比度的影响;武玉松等<sup>[10]</sup>采用脉冲宽度为 260 ns 的光纤激光器对 6061 铝合金进行试验,研究了线间距、电流强度、扫描速度、调 Q 频率 4 个工艺参数对标记图形刻蚀深度的影响;魏鑫磊等<sup>[11]</sup>选用 1060 铝合金,研究了填充方式、扫描速度、功率对图形对比度的影响;Penide 等<sup>[12]</sup>研究了不同波长(535 nm 和 1064 nm)的激光器对铝材烧蚀量的影响;Li 等<sup>[13]</sup>选用 5A06 铝合金研究了激光加工温度和重复次数对加工区形貌的影响。上述研究结果表明,脉冲宽度、扫描速度、频率、激光波长、激光设定功率、材料成分等因素对图形对比度具有显著影响,但所得到的图形均呈灰白色,无法形成高色差、高对比度的黑色图形。

为了解决上述问题,本文采用脉冲宽度为 4 ns 的光纤激光器对阳极氧化的 5052 铝合金进行研究,利用单因素试验法,通过固定扫描速度、频率、扫描

间距,改变激光功率获得高色差、高对比度的黑色图形。同时,分析激光功率对图形对比度的影响规律,通过对比分析激光处理后图形的微观形貌变化,阐述激光表面处理形成图形的机理。所提方法可有效解决阳极氧化铝上激光无法形成高色差、高对比度图形的问题,有助于激光与铝材作用机理的进一步研究,并可推动物联网“一物一码”技术的发展。

## 2 试验

### 2.1 试验设备与材料

试验选用纳秒级( $10^{-9}$  s)短脉宽激光设备,其由激光器、振镜系统、软件控制系统、光路系统构成。该系统可产生波长为 1064 nm、最大平均功率为 20 W 的脉冲激光,焦距为 210 mm,激光束的质量因子  $M^2 < 1.3$ ,聚焦后的光斑直径约为 46  $\mu\text{m}$ 。激光标记设备的工作原理如图 1 所示,光纤激光器产生的激光束经过振镜偏转后,聚焦镜将光束会聚到工作平面上形成聚焦光斑,计算机软件通过控制 X、Y 轴振镜来控制光斑的移动轨迹,进而在材料表面形成标记图形。

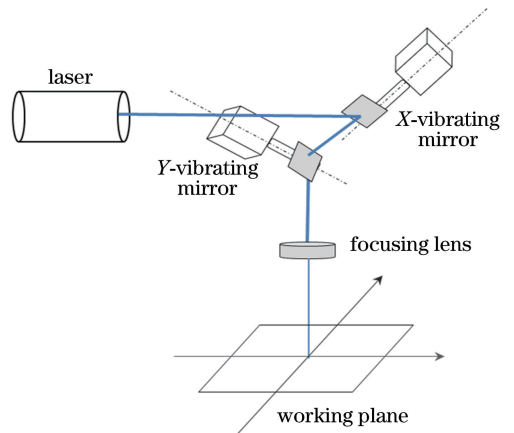


图 1 激光标记设备工作原理图

Fig. 1 Working schematic of laser marking equipment

试验选用厚度为 0.5 mm 的 5052 铝合金板材作为基体材料,成分如表 1 所示,经阳极氧化工艺处理后,采用线切割设备加工成尺寸为 30 mm × 30 mm × 0.5 mm 的样品。为了去除铝合金表面的污渍及粉尘,在激光表面处理前,将试样放入乙醇溶液中进行 1 h 超声波清洗,以减少表面杂质的影响。

### 2.2 试验方法

激光设备控制软件中可调的工艺参数如下:扫描速度范围为 0~2500 mm/s,设定功率范围为 0~100% $P_0$  ( $P_0$  为激光器的额定功率),频率范围为 0~800 kHz,扫描间距为 0~0.1 mm。扫描速度、

表1 5052铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 5052 aluminum alloy (mass fraction, %)

Composition	Al	Mg	Fe	Si	Cr	Cu	Mn	Zn
Content	Bal.	2.2-2.8	0.25	0.25	0.15-0.35	0.1	0.1	0.1

频率、扫描间距的改变会影响光斑重叠率,进而影响激光能量评估结果,所以需要固定扫描速度、频率、扫描间距,采用单因素试验法,只改变激光设定功率,研究激光功率对图形对比度及微观形貌的影响,在大量重复试验后,激光表面处理工艺参数如表2所示。

表2 激光表面处理工艺参数

Table 2 Parameters of laser surface processing

Parameter	Value
Scanning speed / (mm · s <sup>-1</sup> )	130
Setup power / P <sub>0</sub>	23%, 25%, 27%, 33%, 38%, 40%, 50%
Frequency / kHz	300
Pulse length / ns	4
Scanning distance / mm	0.005

### 2.3 测试与分析方法

利用 Laser point Plus2 激光功率计测量激光的输出功率,使用高清相机拍摄图形的宏观效果图,采用 Adobe Photoshop 软件的灰度测量功能分析样品标记区域与未标记区域的灰度值  $I$ , 标记图形的对比度值  $R$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$R = \frac{I_0 - I_m}{I_0 + I_m}, \quad (1)$$

式中  $I_m$ 、 $I_0$  分别为标记区域和未标记区域的平均

灰度值。 $R$  可衡量标记区域与未标记区域的灰度值相对偏差, $R$  值越大,图像的对比度越高。

按照标准的金相试样制备程序进行制样。激光表面处理后,采用金相显微镜与扫描电子显微镜(SEM)观察样品表面的微观形貌。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 激光功率对宏观图形的影响

试验利用纳秒(10<sup>-9</sup> s)级短脉宽激光设备对阳极氧化 5052 铝合金进行表面处理,采用单因素试验法,固定扫描速度、扫描间距、脉冲宽度和频率,设定激光设备的功率为 23% P<sub>0</sub>、25% P<sub>0</sub>、27% P<sub>0</sub>、33% P<sub>0</sub>、38% P<sub>0</sub>、40% P<sub>0</sub>、50% P<sub>0</sub>,氧化铝表面经激光处理后,形成了不同灰度的图形,效果如图2所示。当激光设定功率为 23% P<sub>0</sub> 时,铝材上只有小部分区域被加工,形成颜色较浅且分布不均匀的图形,如图2(a)所示;当激光设定功率为 25% P<sub>0</sub> 时,激光作用效果明显,图形颜色呈浅黑色且逐渐均匀,如图2(b)所示;当设定功率在 27% P<sub>0</sub> ~ 33% P<sub>0</sub> 范围内时,经激光处理的铝材表面图形呈深黑色,如图2(c)、(d)所示;当设定功率为 38% P<sub>0</sub> 时,图形由黑色变为深灰色;当设定功率为 40% P<sub>0</sub> ~ 50% P<sub>0</sub> 时,图形颜色变为浅灰色,如图2(f)、(g)所示。

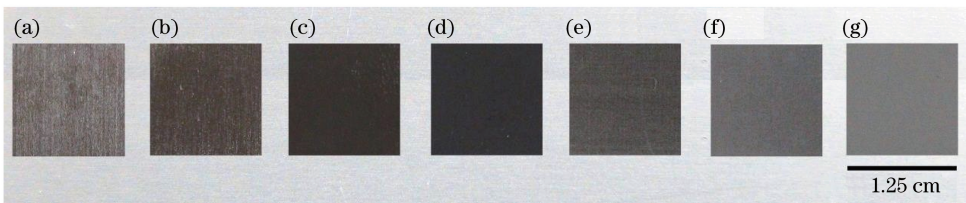


图2 不同功率下阳极氧化 5052 铝合金激光表面处理后的宏观效果。(a) 23% P<sub>0</sub>; (b) 25% P<sub>0</sub>; (c) 27% P<sub>0</sub>; (d) 33% P<sub>0</sub>; (e) 38% P<sub>0</sub>; (f) 40% P<sub>0</sub>; (g) 50% P<sub>0</sub>

Fig. 2 Macroscopic displays on surface of 5052 anodic aluminum oxide alloy after laser surface processing with different setup powers. (a) 23% P<sub>0</sub>; (b) 25% P<sub>0</sub>; (c) 27% P<sub>0</sub>; (d) 33% P<sub>0</sub>; (e) 38% P<sub>0</sub>; (f) 40% P<sub>0</sub>; (g) 50% P<sub>0</sub>

上述结果表明,利用短脉宽激光加工阳极氧化铝表面,可形成高色差、高对比度的图形。从工业扫描枪对图形的识别要求来看,图形颜色越深,则对比度越高,读取率越大,图2(c)、(d)所示样品的颜色能够满足要求。

### 3.2 激光功率对图形对比度的影响

功率的变化对图形宏观效果具有显著影响,采

用 Laser point Plus 2 激光功率计测量不同工艺参数组合下的激光输出功率。图3所示为激光输出功率与对比度的关系,其中 a~g 对应的激光输出功率为 1.64, 1.88, 2.13, 2.76, 3.32, 3.58, 4.66 W。a 点之前激光输出功率 < 1.64 W, 激光能量较低,阳极氧化铝表面无法被激光加工;a~b 段的激光输出功率为 1.64~1.88 W, 部分材料被加工形成图形;b~c

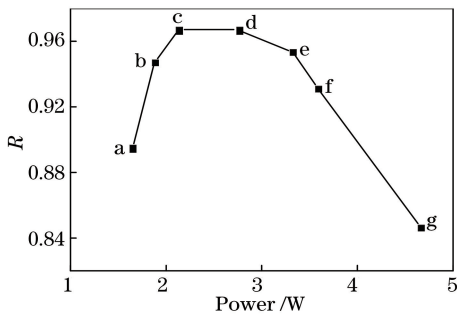


图3 激光输出功率与图形对比度关系

Fig. 3 Laser output power as a function of pattern contrast

段的激光输出功率为 1.88~2.13 W,随激光输出功率的增大,对比度快速增大;c~d 段的激光输出功率为 2.13~2.76 W,对比度最大且基本不变;d~f 段的激光输出功率为 2.76~3.58 W,随着输出功率的增大,图形颜色由黑色向深灰色转变,对比度下降;f~g 段的激光输出功率为 3.58~4.66 W,图形由深灰色转为浅灰色,对比度迅速减小。同时还发现,功率大于 4.66 W 之后,随着激光输出功率的增大,对比度先下降后保持不变。

当扫描速度为 130 mm/s,频率为 300 kHz,脉冲宽度为 4 ns,激光功率为 2.13~2.76 W 时,对比度  $R$  最大。激光功率对图形对比度具有显著影响。当激光输出功率较低时,无法加工铝材,无法在其表面形成标记图形;当激光输出功率超过阈值

1.64 W 时,对比度迅速上升,然后达到最大,之后功率进一步增大,形成的标记图形为灰色,对比度降低。

### 3.3 激光功率对微观形貌的影响

为了探究激光处理形成图形的机理,采用金相显微镜对激光处理后的铝材表面进行微观分析,不同功率下阳极氧化 5052 铝合金激光处理后的微观形貌如图 4 所示。激光照射在铝材表面时,材料表面吸收激光光能并转化为热能,材料表面升温,进而出现表面形貌的变化。当激光功率为 1.64 W 时,材料表面只有小部分受到激光作用发生变化,仍存在一半的区域未形成图形,如图 4(a) 所示;随激光功率升高到 1.88 W,材料表面大部分区域受激光作用,形成不均匀分布的图形,如图 4(b) 所示;当激光功率达到 2.13 W 时,表面发生显著变化,形成大量的细微裂纹,而宏观图形显示为均匀的黑色图形,如图 4(c) 所示;当功率升高到 2.76 W 时,材料表面发生熔化与蒸发,但仍然保留裂纹形貌,此时宏观图形显示为黑色,如图 4(d) 所示;当功率达到 3.32 W 时,铝材表面已完全熔化,裂纹状的微观结构消失,此时宏观图形显示为深灰色,如图 4(e) 所示;当功率继续增大到 3.58 W 时,铝材表面受激光热作用后凝固,形成不光滑的表面,宏观图形显示为灰色,如图 4(f) 所示;当功率增大到 4.66 W 时,加工区内形成平坦层,宏观图形显示为浅灰色,如图 4(g) 所示。

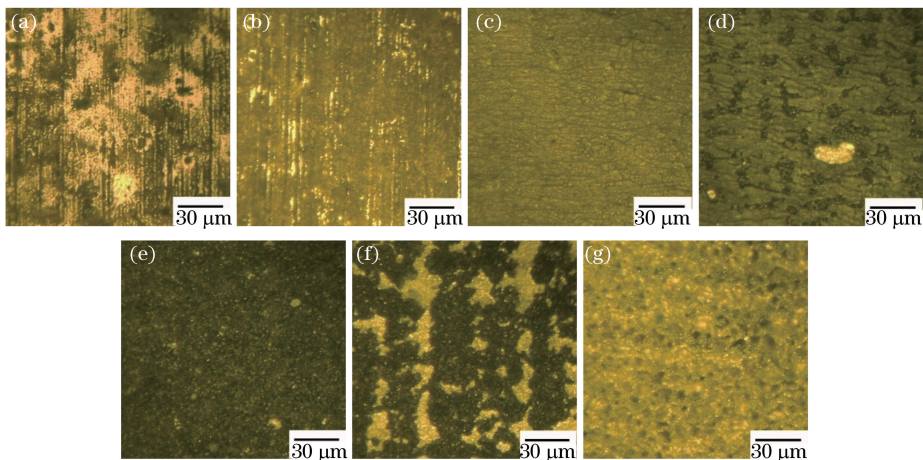


图4 不同功率下阳极氧化 5052 铝合金激光表面处理后的微观形貌。

(a) 1.64 W; (b) 1.88 W; (c) 2.13 W; (d) 2.76 W; (e) 3.32 W; (f) 3.58 W; (g) 4.66 W

Fig. 4 Micro-morphologies on surface of 5052 anodic aluminum oxide alloy after laser surface processing with different setup powers. (a) 1.64 W; (b) 1.88 W; (c) 2.13 W; (d) 2.76 W; (e) 3.32 W; (f) 3.58 W; (g) 4.66 W

### 3.4 激光标记图形的机理分析

利用纳秒级( $10^{-9}$  s)短脉宽光纤激光器,扫描速度为 130 mm/s,设定功率为 33%  $P_0$ ,频率为

300 kHz,脉冲宽度为 4 ns,此时激光光束的平均输出功率为 2.76 W,单脉冲的峰值功率达到 7 kW 时,可获得对比度为 96.67% 的图形。利用 SEM 分析

最优加工参数下的样品,得到铝材表面 SEM 微观形貌图,如图 5 所示。从表面来看,样品的加工区与未加工区存在明显的边界,加工区的表面出现了细裂纹状结构,如图 5(a)所示;将边界放大至 5000 倍时,裂纹状结构的铝材依然为多孔型阳极氧化铝,如

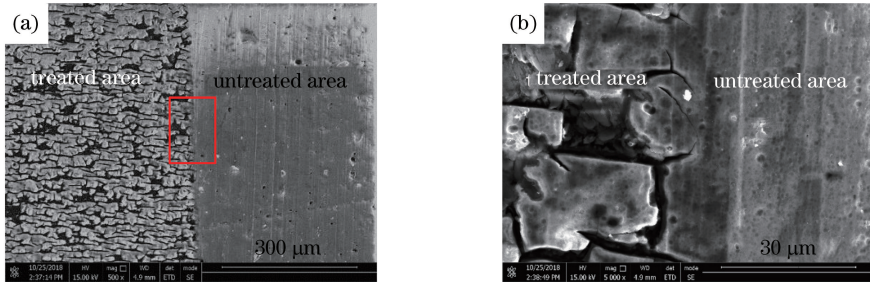


图 5 铝材表面 SEM 微观形貌。(a) 500 倍;(b)局部放大 5000 倍

Fig. 5 SEM micro-morphologies of aluminum surface before and after laser surface processing.

(a) 500 $\times$ ; (b) local amplification for 5000 $\times$

从截面来看,激光加工前的阳极氧化铝材表面为一层连续、平整、厚度均匀的氧化铝薄膜,膜层的厚度约为 3  $\mu\text{m}$ ,如图 6(a)所示;激光加工后,氧化铝膜层和基材铝合金界面处发生明显的变化,氧化铝膜发生了断裂,且在氧化铝膜与基体铝合金之间产生了很多细微的孔洞,如图 6(b)所示,这些细微孔洞的形成原因是铝材将吸收的激光的

图 5(b)所示。激光加工时铝材吸收光能转化为热能,单次脉冲激光光束的作用时间极短(4 ns),峰值功率极高,铝材会在短时间内急速升温,部分材料发生融化与蒸发,进而形成具有细裂纹状结构的表面形貌。

能量转为热能,进而由表面膜层向内部基材传递,而铝合金基材熔点远低于氧化铝膜层,在极短时间内受热熔化再凝固产生了很多微孔。铝基材和氧化铝的热膨胀系数差别很大,导致薄膜发生开裂;同时,氧化铝薄膜融化与蒸发后,形成了裂纹状形貌。这种裂纹状的微观形貌对可见光吸收率高,宏观显示为黑色。

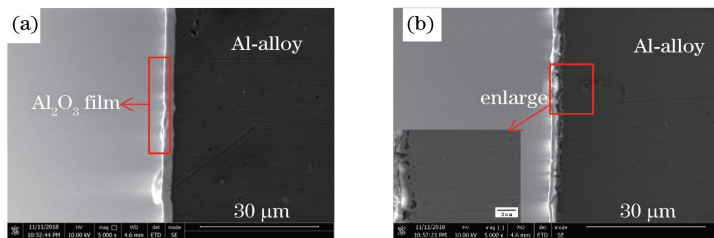


图 6 铝材截面 SEM 微观形貌。(a)激光处理前;(b)激光处理后

Fig. 6 SEM micro-morphologies of aluminum cross section. (a) Before laser surface processing;

(b) after laser surface processing

其他工艺参数固定不变,设定功率为 38% $P_0$ ,在该工艺参数组合下,激光光束的平均输出功率为 3.26 W,图形对比度为 95.34%。采用 SEM 对样品表面的激光处理区和未处理区进行观察,结果如图 7 所示,加工区与未加工区存在明显的界面,由于激光能量较高,加工区内铝材已完全熔化凝固,形成了平坦层;相比于设定功率为 33% $P_0$ 时形成的裂纹状结构,此时加工区的吸光率下降,宏观显示为深灰色。

## 4 结 论

采用短脉宽的脉冲光纤激光在阳极氧化 5052 铝合金表面,通过调整激光参数改变激光能量,得到

了高色差、高对比度图形,有效解决了铝材激光标记的应用过程中存在的问题。激光功率对图形对比度有显著影响。当激光功率低于 1.64 W 时,光束能量无法达到铝合金熔化阈值,表面无法形成标记图形;当激光功率为 2.13~2.76 W 时,激光能量超过阈值,材料表面部分融化与蒸发,对比度迅速上升至最大;当激光功率高于 3.58 W 时,高激光能量使材料表面完全熔化,形成灰色的标记图形,对比度下降。通过优化激光表面处理工艺参数组合,发现当扫描速度为 130 mm/s,频率为 300 kHz,脉冲宽度为 4 ns,扫描间距为 0.005 mm,设定功率为 27% $P_0$ ~33% $P_0$ 时,标记图形的对比度最大。

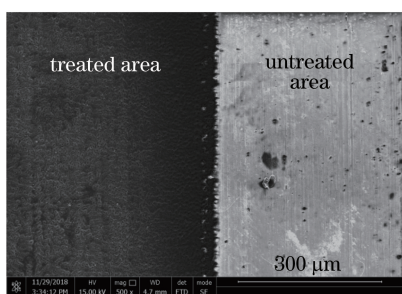


图7 设定功率为38% $P_0$ 时铝材表面SEM微观形貌

Fig. 7 SEM micro-morphologies of aluminum surface before and after laser surface processing with setup power of 38% $P_0$ .

激光在铝材表面诱导形成微细裂纹结构,该结构对可见光吸收率较高,阳极氧化5052铝合金在激光表面处理后形成了高色差、高对比度图形,标记图形宏观上呈现黑色,对比度高。微细裂纹的形成原因如下:一方面,铝合金基体与氧化铝膜层的热膨胀系数不同,热胀冷缩使得膜层开裂;另一方面,高能激光对氧化铝膜层有一定的刻蚀作用。

### 参 考 文 献

- [1] Han T, Wen P Y, Wang C Y, *et al.* Research progress in PAA template [J]. *Materials Review*, 2010, 24(1): 115-119.  
韩婷, 温培源, 王晨雨, 等. 多孔阳极氧化铝模板制备的研究进展[J]. *材料导报*, 2010, 24(1): 115-119.
- [2] Guo Z G, Liu X D, Ni Y. Applied research of laser marking in code bar [J]. *Laser Journal*, 2004, 25(3): 72-73.  
郭治国, 刘晓东, 倪宇. 激光标刻在条码技术中的应用研究[J]. *激光杂志*, 2004, 25(3): 72-73.
- [3] Ding Y X, Zhou L Z. Status and development of laser surface treating [J]. *Metal Hotworking Technology*, 2007, 36(6): 69-72.  
丁阳喜, 周立志. 激光表面处理技术的现状及发展[J]. *热加工工艺*, 2007, 36(6): 69-72.
- [4] Han H M, Han J P, Song K W, *et al.* A method of laser purge aluminum alloy [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(6): 776-779.  
韩红敏, 韩建平, 宋可为, 等. 铝合金的一种激光表面处理[J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(6): 776-779.
- [5] Gao H Z, Li J M, Huo M Y. Development and expectation of coloring mechanism of nanosecond laser on metal surface [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(5): 752-758.  
高鸿志, 李建美, 霍孟友. 纳秒激光金属表面着色技

术机理研究的发展与展望 [J]. *应用激光*, 2017, 37(5): 752-758.

- [6] Li Y B, Bai F, Fan W Z, *et al.* Color difference analysis of femtosecond laser colorized metals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0714003.  
李阳博, 柏锋, 范文中, 等. 飞秒激光金属着色颜色差分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0714003.
- [7] Xie Z W, Dong S Y, Yan S X, *et al.* Morphological adjustment of 304 stainless steel by picosecond laser micro-nano fabrication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031402.  
谢志伟, 董世运, 闫世兴, 等. 皮秒激光微纳加工304不锈钢形貌调控 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031402.
- [8] Cao R H. Research on quality assessment and evaluation technique of 2D-barcode using laser direct part marking [D]. Jinan: Shandong University, 2012.  
曹荣华. 激光直接标记二维条码的质量检测与评价技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [9] Tao L, Li J M, Li Y L. Processing parameters optimization and quality inspection of water-assisted laser marking two dimensional barcodes on metal surfaces [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(2): 268-275.  
陶亮, 李建美, 李云龙. 水辅助条件下金属表面激光标记二维条码质量检测与工艺优化 [J]. *应用激光*, 2017, 37(2): 268-275.
- [10] Wu Y S, Li J M, Lu C H, *et al.* Influence of laser parameters on quality of laser direct marked data matrix symbols on aluminum alloy [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2014, 31(7): 865-869.  
武玉松, 李建美, 路长厚, 等. 激光参数对铝合金表面标刻条码质量的影响研究 [J]. *机电工程*, 2014, 31(7): 865-869.
- [11] Wei X L, Li C L, Xue W, *et al.* Smart phone recognition characteristics of laser marking barcodes on aluminum alloy surface [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 633-637.  
魏鑫磊, 李春林, 薛伟, 等. 激光标刻铝合金2维码的手机识读特性研究 [J]. *激光技术*, 2016, 40(5): 633-637.
- [12] Penide J, Quintero F, Riveiro A, *et al.* High contrast laser marking of alumina [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 336: 118-128.
- [13] Li X S, He W P, Lei L, *et al.* Laser direct marking applied to rasterizing miniature data matrix code on aluminum alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 77: 31-39.